

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第11期

Vol.35 No.11

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征	邵平, 安俊琳, 杨辉, 林旭, 吉东生 (4031)
亚青会期间南京污染气体与气溶胶中水溶性离子的分布特征	邹嘉南, 安俊琳, 王红磊, 邵平, 段卿, 薛国强, 庞博 (4044)
亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系	袁亮, 银燕, 李琦, 肖辉, 李力 (4052)
2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析	廖志恒, 范绍佳, 黄娟, 孙家仁 (4061)
在线单颗粒气溶胶质谱 SPAMS 对细颗粒物中主要组分提取方法的研究	付怀于, 闫才青, 郑玫, 蔡靖, 李小滢, 张延君, 周振, 傅忠, 李梅, 李磊, 张远航 (4070)
PM ₁₀ 可替代源成分谱的建立方法及其应用	陈强, 景毅, 吴焕波, 王芳 (4078)
夏季东海和南黄海一氧化氮的浓度分布、海-气通量和微生物消耗研究	王敬, 陆小兰, 杨桂朋, 徐冠球 (4085)
三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征	王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇 (4095)
浑太水系水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性	刘娜娜, 李斌, 刘瑞霞, 宋永会, 吴畏 (4103)
深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究	赵晨辰, 张世彦, 毛献忠 (4111)
滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性	熊强, 焦立新, 王圣瑞, 彭希琰 (4118)
金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价	周晓红, 刘龙梅, 陈曦, 陈志刚, 张金萍, 李义敏, 刘彪 (4127)
西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估	谢婷, 罗东霞, 杨瑞强 (4135)
西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析	袁宏林, 李星宇, 王晓昌 (4143)
城市不同下垫面降雨径流多环芳烃 (PAHs) 分布及源解析	武子澜, 杨毅, 刘敏, 陆敏, 于英鹏, 汪青, 郑鑫 (4148)
粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响	陈昱霖, 李田, 顾俊青 (4157)
饮用水处理中不同来源生物活性炭微生物群落多样性和结构研究	杜尔登, 郑璐, 冯欣欣, 高乃云 (4163)
压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究	蒋新跃, 栾清, 丛海兵, 徐思涛, 刘玉娇, 朱学源 (4171)
基于膜特征参数变化的蛋白质超滤过程膜污染研究	王旭东, 张银辉, 王磊, 张慧慧, 夏四清 (4176)
臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究	曹飞, 袁守军, 张梦涛, 王伟, 胡真虎 (4185)
电辅助微生物反应器降解苯并噻唑效能的研究	刘春苗, 丁杰, 刘先树, 程旺斌 (4192)
铁镧复合氧化物纳米吸附剂的制备、表征及 As(Ⅲ) 吸附性能研究	张伟, 陈静, 张高生 (4198)
重金属铬胁迫下水蚯蚓的生理响应研究	楼菊青, 杨东叶, 曹永青, 孙培德, 郑平 (4205)
光质对蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 生长特征及生化组成的影响研究	唐青青, 方治国, 嵇雯雯, 夏会龙 (4212)
常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响	任玉辉, 王科, 李相昆, 马凯丽, 张杰 (4218)
Fe ²⁺ 和 Fe ³⁺ 对厌氧氨氧化污泥活性的影响	李祥, 黄勇, 巫川, 王孟可, 袁怡 (4224)
CSTR 中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究	阴方芳, 刘文如, 王建芳, 吴鹏, 沈耀良 (4230)
盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中 N ₂ O 产生量的影响	王珊珊, 梁红, 高大文 (4237)
硫酸盐还原反应器污泥驯化过程中微生物群落变化分析	曾国驱, 贾晓珊, 郑小红, 杨丽平, 孙国萍 (4244)
利用铅同位素方法量化不同端元源对南京土壤和长江下游悬浮物铅富集的影响	王成, 夏学齐, 张义, 廖启林, 杨忠芳, 季峻峰 (4251)
北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征	苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 乔肖翠, 崔亚丰 (4257)
环境因素对土壤中几种典型四环素抗性基因形成的影响	张俊, 罗方园, 熊浩微, 焦少俊, 叶波平 (4267)
稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征	刘若萱, 贺纪正, 张丽梅 (4275)
典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义	靳振江, 汤华峰, 李敏, 黄炳富, 李强, 张家喻, 黎桂文 (4284)
变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响	王莲阁, 高岩红, 丁长欢, 慈恩, 谢德体 (4291)
铁氧化物与电子供体基质交互作用对红壤性水稻土中 DDT 还原脱氯影响	刘翠英, 徐向华, 王壮, 姚童言 (4298)
植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究	卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 龙新宪 (4305)
不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征	李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 李君剑 (4313)
不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究	李平, 郎漫, 徐向华, 李煜珊, 朱淑娟 (4321)
转 Cry1Ac 基因抗虫棉与其亲本棉花根际真菌多样性的比较	潘建刚, 焦海华, 白志辉, 齐鸿雁, 马安周, 庄国强, 张洪勋 (4329)
天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集	郑顺安, 韩允垒, 郑向群 (4338)
1-硝基芘和 1,2-萘醌的联合细胞毒性和致 DNA 损伤	尚羽, 蒋玉婷, 张玲, 李怡 (4345)
鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究	卜贵军, 于静, 邱慧慧, 罗世家, 周大寨, 肖强 (4352)
污泥预植重金属 Cu 炭化及炭中重金属的稳定性研究	窦晓敏, 陈德珍, 戴晓虎 (4359)
上层曝气式生物反应器填埋工艺特性的研究	田颖, 王坤, 徐期勇 (4365)
硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场 N ₂ O 产生的影响	卞荣星, 孙英杰, 李晶晶, 张欢欢 (4371)
中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究	蒋晶晶, 叶斌, 计军平, 马晓明 (4378)
泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究	赵海霞, 蒋晓威, 崔建鑫 (4387)
基于污染防治技术模拟的造纸行业环境管理方法研究	张雪莹, 温宗国 (4395)
大气棕色碳的研究进展与方向	闫才青, 郑玫, 张远航 (4404)
《环境科学》征稿简则 (4094) 《环境科学》征订启事 (4126) 信息 (4243, 4266, 4274, 4328)	

鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究

卜贵军^{1,2}, 于静³, 邸慧慧⁴, 罗世家^{1,2}, 周大寨¹, 肖强^{1,2*}

(1. 湖北民族学院生物资源保护与利用湖北省重点实验室, 恩施 445000; 2. 湖北民族学院林学院园艺学院, 恩施 445000; 3. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059; 4. 湖北省烟草公司恩施州公司, 恩施 445000)

摘要: 采用离子色谱、三维荧光光谱、紫外-可见吸收光谱和多元统计分析, 研究了鸡粪堆肥水溶性有机物 (DOM) 和重金属组成与演化特性, 探究了有机物演化对重金属生物有效性的影响及其机理。结果显示, 堆肥升温期和高温期有机物降解最为剧烈, 产生了大量苹果酸、酒石酸、乙酸和草酸, 其浓度分别在 2 097.55 ~ 2 155.61、39.24 ~ 51.58、12.52 ~ 12.90 及 1.68 ~ 2.31 mg·L⁻¹ 之间; 堆肥降温期和二次发酵过程, 蛋白类物质降解, 腐殖质类物质合成, DOM 的腐殖化率和缩合度增大, 稳定性增强。堆肥过程中水溶态重金属中 Fe 的浓度 (1.069 ~ 7.106 mg·L⁻¹) 最高, Al、As、Cr、Cu 和 Mn 的浓度 (0.1 ~ 1.008 mg·L⁻¹) 其次, Pb 的浓度 (0.003 ~ 0.02 mg·L⁻¹) 最低, 随着堆肥的进行水溶态重金属含量呈下降趋势 (Al 除外), 相关性分析显示, 水溶态重金属主要结合在腐殖质类物质上, 生物可利用性低。分析结果表明, 堆肥可通过降低水溶态重金属的含量和将水溶态重金属络合在腐殖质类物质上降低产品中重金属的生物有效性。

关键词: 鸡粪; 堆肥; 有机物; 重金属; 生物有效性

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)11-4352-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.11.043

Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals

BU Gui-jun^{1,2}, YU Jing³, DI Hui-hui⁴, LUO Shi-jia^{1,2}, ZHOU Da-zhai¹, XIAO Qiang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Biologic Resources Protection and Utilization of Hubei Province, Hubei Minzu University, Enshi 445000, China; 2. College of Forest and Horticulture, Hubei Minzu University, Enshi 445000, China; 3. State Key Laboratory of Geological Hazard Prevention and Geological Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 4. Enshi Tobacco Company of Hubei Province, Enshi 445000, China)

Abstract: Ion chromatography, fluorescence spectroscopy, UV-visible absorption spectroscopy and multivariate statistical analysis were applied to study the composition and evolution characteristics of dissolved organic matter (DOM) and heavy metal extracted from chicken manure during composting, and the influence of organic matter evolution on the bioavailability of these heavy metals was further investigated. The result showed that, a large number of organic acids were generated during the active stage, and their concentrations were in the range of 2 097.55-2 155.61 mg·L⁻¹, 39.24-51.58 mg·L⁻¹, 12.52-12.90 mg·L⁻¹ and 1.68-2.31 mg·L⁻¹, respectively. During the curing stage, protein-like matter was degraded, whereas humic-like substances were formed, which increased the humification degree, condensation degree and stability of DOM. The content (1.069-7.106 mg·L⁻¹) of dissolved iron ranked first during composting, that of dissolved Al, As, Cr, Cu and Mn (0.1-1.008 mg·L⁻¹) ranked second, and the concentration of dissolved lead was the lowest. Concentrations of all heavy metals decreased during composting except aluminum. Furthermore, the result from correlation analysis showed that these dissolved heavy metals were bound with DOM, and their bioavailability was low. It could be concluded that, the bioavailability of the heavy metals in chicken manures became lower through the decrease of dissolved heavy metals and the binding between dissolved heavy metals and humic-like substances.

Key words: chicken manure; composting; organic matter; heavy metals; bioavailability

堆肥是畜禽粪便常用的一种处理方式, 在堆肥过程中, 一部分有机物在微生物作用下降解成二氧化碳、水及氨等物质, 导致堆体减容减重; 另一部分有机物在微生物的作用下转化为富里酸、胡敏酸及胡敏素类等腐殖质物质, 增强了堆肥的稳定性^[1-3]。堆肥过程中, 大部分有机物只有在溶于水后才能被微生物利用, 因此, 水溶性有机物 (DOM) 是研究堆肥物质转化的重要介质, 它比固相有机质

更能灵敏反映堆肥过程物质演化特征^[4-6]。此外, 堆肥 DOM 中含有的有机酸和腐殖酸类物质, 能够吸附和络合重金属, 引起后者存在形态和生物有效

收稿日期: 2014-03-31; 修订日期: 2014-05-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31260057); 湖北省科技厅自然科学基金项目 (B2013077); 生物资源保护与利用湖北省重点实验室第四批开放基金项目 (PKLHB1322)

作者简介: 卜贵军 (1981 ~), 男, 讲师, 主要研究方向为物质微观结构, E-mail: 379977049@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: hbmysws@126.com

性的改变^[7]。因此,近年来,相关学者采用各种技术如荧光光谱、红外光谱及离子色谱等^[7~9],对堆肥 DOM 组成和结构进行分析,探究堆肥物质演化规律及其环境效应。

畜禽粪便中含有一定量的重金属,堆肥过程有机物降解造成的“浓缩效应”进一步提高了其含量,使重金属成为堆肥农用的一个重要限制因子^[5]。按照 Tissier 的五步提取法,堆肥重金属可分为可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态,在这 5 种形态的重金属中,可交换态中水溶态重金属的活性最高,对植物的生物有效性最大,其他各种形态的重金属,包括与有机物结合的部分,通常情况下不参与对植物的供给,生物有效性较低^[10]。因此,研究畜禽粪便堆肥过程水溶态重金属的含量及其变化特征,对于堆肥产品农用风险评价具有重要意义,而这一方面目前国内外鲜有报道。

基于此,采集不同堆肥阶段的鸡粪样品,利用离子色谱、三维荧光光谱、紫外-可见吸收光谱和质谱,分别对这些样品浸提液中的小分子有机酸、腐殖质和重金属的含量和变化进行分析,研究堆肥有机物演化对重金属生物有效性的影响特征及其机制,以期对堆肥产品农用风险评价提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 堆肥过程与样品采集

于养殖场采集鸡粪,剔除其中的羽毛、石块和塑料等杂物后,往里面添加割至 3~5 cm 的杂草和树叶,调堆体混合物 C/N=26.5,含水率 56% 后,在一个自制的静态堆肥反应器中强制通风进行堆肥,堆肥过程温度上升迅速,第 5 d 温度超过 60℃,随后一直维持在 60℃ 以上,第 10 d 进行翻堆,随后温度开始缓慢下降,第 32 d 降至室温。加水翻堆进行二次发酵,第 42 d 二次发酵结束,于堆肥的 0、5、10、32 及 42 d 采集堆肥样品,放置冰箱冷藏备用。

1.2 水溶性有机物提取制备

以堆肥干重固液比 1(g):10(mL)将鸡粪样品与双蒸水混合,浸提振荡 12 h 后,4℃ 下高速离心 15 min,上清液过 0.45 μm 滤膜,收集滤液,滤液中 DOM 含量(以溶解性有机碳 DOC 计)采用德国耶拿公司生产的 multi N/C 2100 型 TOC 仪测定。

1.3 离子色谱测定及数据处理

采用美国戴安公司生产的 ICS-2000 离子色谱仪、ED40 电化学检测器和 Chromeleon 6.5 色谱工作站测定堆肥 DOM 中的小分子有机酸(乙酸、琥珀

酸、苹果酸、草酸、酒石酸),离子色谱其他测试条件以及样品中腐殖质的去除参考文献[11]进行。测定完后将所有有机酸加和,得到总酸含量。

1.4 荧光光谱测定及数据处理

将所有滤液稀释 50 倍后,采用日本日立公司生产的 F-7000 荧光分光光度计,测定激发波长(E_x)200~400 nm,发射波长(E_m)280~500 nm 范围内的三维荧光光谱图,并以双蒸水的三维荧光图空白进行扣除,随后数据导出,参考 He 等的报道^[4],在 Matlab 7.0b 上,计算三维荧光光谱中区域 200~250 nm/280~330 nm、200~250 nm/330~380 nm、200~250 nm/380~500 nm、>250 nm/280~380 nm、>250 nm/380~500 nm 范围内的体积积分,其值分别标记为 v_1 、 v_2 、 v_3 、 v_4 及 v_5 。

1.5 紫外-可见光谱测定及数据处理

将所有滤液以双蒸水稀释 50 倍后,采用日本岛津公司生产的 UV1700 紫外-可见分光光度计,测定 190~670 nm 范围内的紫外吸收值。参考前人报道^[12],计算 260~280、460~480 及 600~670 nm 波长范围内的积分面积 A_1 、 A_2 及 A_3 。

1.6 重金属测定及数据分析

采用美国热电公司生产的 ICP-OES 重金属测定仪,测定堆肥滤液中 Al、As、Cr、Cu、Fe、Mn 和 Pb 的浓度。并在 SPSS 16.0 上,对重金属和堆肥有机物进行相关性分析和主成分分析^[5],研究堆肥过程水溶性有机物演化对重金属分布的影响。

2 结果与讨论

2.1 堆肥过程有机物降解研究

根据前人的报道可知^[13,14],堆肥过程有机质的演化可分为降解、腐殖化及进一步聚合和压缩这 3 个过程。降解的中间产物为小分子有机酸,腐殖化的产物为腐殖酸,而高度聚合化的结果是堆肥有机物分子聚合度的提高。因此,本研究从堆肥过程小分子有机酸、腐殖酸和高聚合度有机物的组成和变化来分析堆肥过程 DOM 的演化特征及其机制。

表 1 为不同堆肥阶段 DOM 中小分子有机酸的含量,该表显示,乙酸在整个堆肥过程中均能检测到,为堆肥中最常见的小分子有机酸,但是堆肥 DOM 中乙酸浓度较低,在堆肥过程中其分布在 2.24~13.04 mg·L⁻¹之间;琥珀酸在堆肥初期和高温期均未检测到,直到堆肥结束时才检测到,其浓度(66.1 mg·L⁻¹)较高;苹果酸为堆肥 DOM 中浓度最

高的小分子有机酸,其在堆肥初期和高温期的浓度超过 $2\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,但是,该酸在一次发酵结束和二次发酵过程均未检测到,暗示苹果酸主要为有机物降解中间产物;堆肥 DOM 中草酸的浓度分布在

$1.68\sim2.39\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,但是该酸堆肥初始和一次发酵结束均未检测到;酒石酸在一次发酵过程中的浓度分布在 $39.24\sim51.58\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,二次发酵产物中未检测到.

表 1 鸡粪堆肥过程小分子有机酸含量变化¹⁾/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Changes in the content of organic acids during chicken manure composting/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

时间/d	乙酸	琥珀酸	苹果酸	草酸	酒石酸	总酸
0	12.90	nd	2 097.55	nd	39.24	2 149.69
5	12.52	nd	2 155.61	2.36	43.09	2 213.58
10	12.79	nd	2 136.94	1.68	51.58	2 202.99
32	2.24	nd	nd	nd	46.70	48.94
42	13.04	66.10	nd	2.39	nd	81.53

1) nd 表示未检测到

总体看来,各种有机酸主要出现在一次发酵过程中,尤其是一次发酵的高温期,其浓度含量最高($>2\,200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),而在二次发酵过程中,有机酸的含量较低($<100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),许多小分子有机酸未检测到,李英军等对鸡粪堆肥样品浸提液中小分子有机酸含量的分析也得到了类似的结果^[11]. 由于小分子有机酸来自堆肥有机物的降解,其含量可以直接反映堆肥过程有机物的降解剧烈程度,故上述结果表明,鸡粪堆肥过程有机物的降解主要发生在堆肥初期和高温期,而在堆肥后期和二次发酵过程中,有机物降解较少.

2.2 堆肥过程有机物腐殖化研究

堆肥腐殖化的产物是腐殖酸类物质,腐殖酸中由于含有大量的苯环结构,在吸收一定的光能后能够产生荧光,所产生的荧光光谱特征与腐殖酸分子结构直接有关,因此,本研究采用三维荧光光谱研究堆肥过程有机物的腐殖化过程^[12].

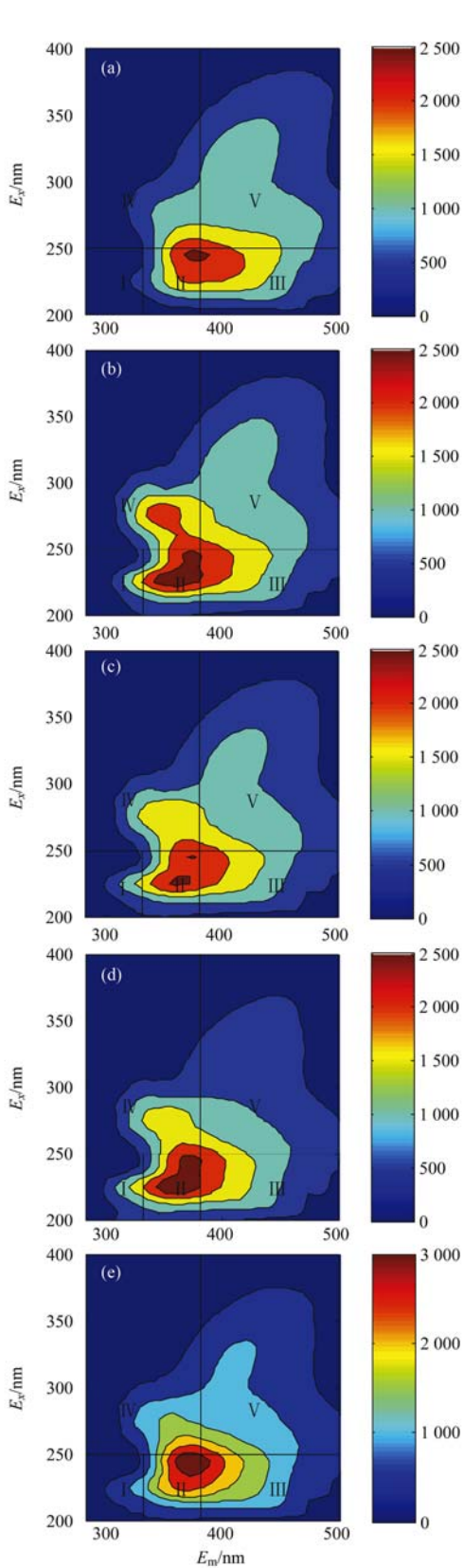
不同堆肥阶段 DOM 的三维荧光光谱如图 1 所示,该图显示,鸡粪 DOM 的三维荧光光谱图主要有 4 个荧光峰,其峰位值分别位于 $270\text{ nm}/350\text{ nm}$ 、 $245\text{ nm}/375\text{ nm}$ 、 $225\text{ nm}/365\text{ nm}$ 及 $325\text{ nm}/420\text{ nm}$ 附近,根据前人的报道可知,前 3 个荧光峰为类蛋白荧光峰,而第 4 个荧光峰为类腐殖质荧光峰^[15,16]. 在这 4 个荧光峰中,前 3 个类蛋白荧光峰强度较高,而第 4 个类腐殖质荧光峰强度较弱,并且文献^[15~17]所报道的类腐殖质峰中的另外一个峰——类富里酸峰,在本研究中未观察到,可能被附近的类蛋白峰掩盖了. He 等^[4]对生活垃圾堆肥过程 DOM 三维荧光光谱的研究也显示,堆肥 DOM 组成复杂,不同荧光基团产生的荧光峰可能相互重叠.

为研究堆肥过程类蛋白和类腐殖质物质含量变化,本研究将堆肥 DOM 的三维荧光光谱根据文献

报道分为 5 个区域^[4],其中区域 I、II、IV 为类蛋白质,而区域 III 和 V 为类腐殖质物质^[17]. 图 2 为 5 个区域对应的体积在堆肥过程中的变化图,其中显示,堆肥过程区域 I、II、IV 在初期(0~5 d)呈上升趋势,随后其浓度下降,总体呈下降趋势,显示堆肥过程类蛋白质在发酵初期不断增多,随后不断降低. 初期的增多可能与微生物活动旺盛、大量不可溶的蛋白类物质被溶出和释放有关,而后期的降低与这一时期类蛋白质大部分被降解有关. 与类蛋白质不同,类腐殖质荧光区 III 和 V 在堆肥初期呈下降趋势,而在后期和二次发酵过程该值明显上升,显示堆肥初期简单的类腐殖质物质也不断被降解和转化,在堆肥后期腐殖质不断被合成,含量增加,即堆肥过程腐殖化作用主要发生在堆肥后期和二次发酵过程中.

2.3 堆肥过程有机物聚合化研究

前人研究显示,在有机物的紫外-可见吸收光谱中,波长 $260\sim280\text{ nm}$ 、 $460\sim480\text{ nm}$ 和 $600\sim700\text{ nm}$ 范围内的吸收值 A_1 、 A_2 和 A_3 依次与苯环化合物含量、开始腐殖化有机物的含量及高度聚合有机物的含量有关^[18]. 图 3(a)显示,堆肥初期(0~5d) A_1 的积分面积呈下降趋势,而在随后的 5~32 d 又呈上升趋势,尤其是在堆肥的 5~10 d 上升最为剧烈,显示在堆肥升温期苯环化合物不断减少,在堆肥的高温期和降温期苯环化合物不断增多,表明堆肥升温期是有机物的降解期,而高温期和降温期由于苯环化合物在合成腐殖质物质,其浓度不断升高,二次发酵过程中 A_1 的下降可能与这一时期主要出于厌氧过程,苯环化合物被降解有关. 堆肥过程 A_2 和 A_3 的变化与 A_1 类似,其上升最为剧烈的为堆肥 5~10 d,显示这一时期是有机物腐殖化和缩合化最为剧烈的时期.



(a)、(b)、(c)、(d)、(e)依次为0、5、10、32、42 d堆肥样品

图1 鸡粪堆肥过程水溶性有机物三维荧光光谱图变化

Fig. 1 Changes in the three dimensional fluorescence spectra of dissolved organic matter during chicken manure composting

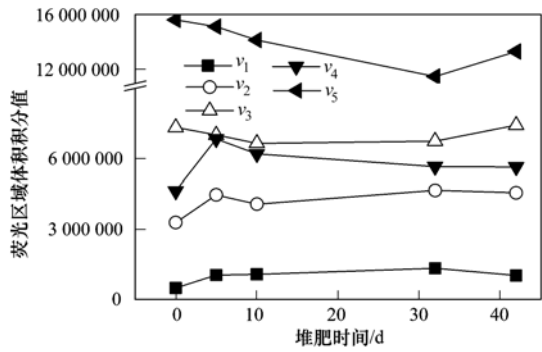


图2 鸡粪堆肥过程不同荧光组分的变化特征

Fig. 2 Change characteristics of different florescence fractions during chicken manure composting

根据前人的报道^[12,18],腐殖化指数被定义为面积 A_2 与 A_1 的比值(A_2/A_1)、 A_3 与 A_1 的比值(A_3/A_1)以及 A_3 、 A_2 之和与 A_1 的比值(A_{3+2}/A_1)。 A_2/A_1 反映了木质素在开始转化时的比例, A_3/A_1 表示了腐殖化物质和非腐殖化物质的比例,而 A_{3+2}/A_1 可表征腐殖化与非腐殖化物质的相关性,该值增加速率越快,腐殖化水平越大。图3(b)显示, A_2/A_1 、 A_3/A_1 及 A_{3+2}/A_1 在堆肥的0~10 d呈不断上升趋势,这依次说明堆肥中木质素在开始转化时的含量越来越高、腐殖化物质与非腐殖化物质的比率越来越高、以及腐殖化增大水平越来越大(即有机物缩合度不断提高)。在随后的降温期, A_2/A_1 和 A_3/A_1 呈下降趋势,显示可转化的木质素的含量和腐殖质物质的相对含量不断减少,即部分缩合度不高的芳构化物质被降解了,但是,在二次发酵过程中, A_2/A_1 、 A_3/A_1 及 A_{3+2}/A_1 值又开始上升,显示二次发酵提高了堆肥的腐殖化率和有机物分子的聚合度。综合以上结果可以知道,堆肥过程有机物的腐殖化和高度聚合化主要发生在高温期和二次发酵过程。

2.4 堆肥过程水溶性重金属变化分析

在堆肥中的各形态的重金属中,水溶态重金属的活性最高,其最容易被植物利用,毒性最强。因此,本研究分析了堆肥过程水溶态重金属的含量及其变化,结果如表2所示。在所分析的7种重金属中,Fe的浓度最高,其在堆肥过程中的浓度分布在 $1.069 \sim 7.106 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间;Al、As、Cr、Cu和Mn的浓度分布在 $0.1 \sim 1.008 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,显著低于Fe的含量;堆肥浸提液中浓度最低的重金属为Pb,其值在 $0.003 \sim 0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内,不足其他重金属的十分之一。

Al在堆肥过程中的变化波动较大,经堆肥后其浓度由 $0.027 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升至 $0.744 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,显示堆

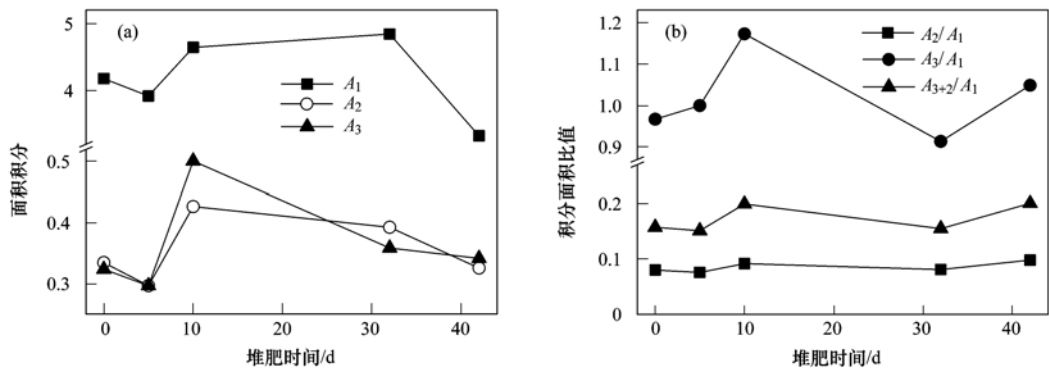


图3 鸡粪堆肥过程特征紫外吸收参数变化

Fig. 3 Changes in the UV-visible parameter during chicken manure composting

肥处理增加了鸡粪中水溶态 Al 的含量; Cr、Cu、Mn 及 Pb 的浓度,随着堆肥的进行持续降低,表明堆肥处理可以有效降低 Cr、Cu、Mn 及 Pb 的溶出,进而降低了其生物可利用性; As 和 Fe 的浓度尽管

在堆肥过程中出现了波动,但是经堆肥处理后其浓度也明显下降,尤其是 Fe,由未堆肥的 $5.958 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至堆肥结束的 $1.069 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,显示堆肥处理也降低了 As 和 Fe 的生物有效性.

表2 鸡粪堆肥过程水溶性重金属和有机物含量变化/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 2 Changes of dissolved heavy metals and organic matter during chicken manure composting/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

时间/d	Al	As	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	DOC
0	0.027	0.441	0.212	1.008	5.958	0.298	0.018	2 492
5	0.148	0.383	0.194	0.772	5.628	0.292	0.02	2 798
10	0.036	0.351	0.182	0.618	7.106	0.203	0.019	2 335
32	0.744	0.28	0.173	0.394	4.943	0.188	0.013	1 615
42	0.437	0.359	0.121	0.375	1.069	0.095	0.003	2 292

2.5 堆肥有机物演化对重金属分布影响

除了 Cr 可以阴离子形式存在而不与有机物结合外,包括 Al 在内的其他金属均能与有机物结合^[19~21]. 表2显示,堆肥浸提液中 DOM 浓度较高 ($>1 615 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),其上的官能团可能对重金属的分布和生物有效性产生重要影响^[7]. 为阐明这种影响,本研究采用相关性分析和主成分分析,研究了堆肥 DOM 组成对重金属分布的影响.

表3显示,除了 Al 外,堆肥浸提液中的 DOM 的浓度(DOC)随重金属含量增加呈增加态势,但是堆肥 DOC 与重金属浓度未呈现显著相关性,这一结果表明,堆肥浸提液中并不是所有的有机物都能影响重金属的分布;相关分析也表明,堆肥 DOM 中的小分子有机酸含量与重金属未呈现出显著相关(数据未列出),因此可以知道这一部分有机物在堆肥过程对重金属分布影响不大;除了小分子有机酸外,腐殖质和蛋白类物质也是堆肥 DOM 的重要组成部分,因此,本研究对堆肥浸提液中的重金属与腐殖质及蛋白类物质进行了相关性分析,结果显示,堆肥浸提液中 As 和 Cu 的含量与区域体积 v_5 (类腐殖质物

质)显著相关($P < 0.05$),而与区域体积 v_1 、 v_2 、 v_4 (类蛋白质)及区域体积 v_3 (类富里酸物质)均未达到显著相关,显示堆肥浸提液中 As 和 Cu 主要结合在类腐殖质物质上. 一般而言,类腐殖质物质结构复杂、分子量大,生物可利用性低^[22, 23],浸提液中 As 和 Cu 与类腐殖质物质结合在一起,其生物可利用性低. 剩余的水溶态重金属中, Pb 和 Mn 的含量尽管未与类腐殖质物质荧光区区域体积达到显著相关,但是其相关性指数高于类蛋白和类富里酸物质,显示浸提液中大部分 Pb 和 Mn 也与类腐殖质物质结合在一起,生物有效性也低. Cr 和 Fe 含量与类腐殖质在堆肥过程呈现相同的变化趋势,但是二者相关性较差,这可能分别来自于下列原因: Cr 可以阴离子的形式存在,导致其与重金属结合很难;而 Fe 在堆肥过程中,可以通过还原作用由溶解度较低的三价铁转化为溶解度较高的二价铁^[24]. Al 与区域体积 v_5 (腐殖质物质)呈现负相关,而与区域 v_1 和 v_2 (类蛋白质)正相关,显示浸提液中 Al 主要结合在易微生物利用的类蛋白质上,生物可利用性高.

表 3 堆肥样品中水溶性重金属与有机物含量相关性分析¹⁾

Table 3 Correlation analysis between dissolved heavy metals and organic matter in the compost sample

	DOC	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
Al	-0.824	0.691	0.715	-0.123	-0.033	-0.925 *
	0.087	0.196	0.174	0.844	0.958	0.024
As	0.805	-0.940 *	-0.795	0.623	-0.329	0.943 *
	0.1	0.017	0.108	0.262	0.589	0.016
Cr	0.312	-0.462	-0.647	-0.271	-0.107	0.558
	0.61	0.433	0.238	0.659	0.864	0.328
Cu	0.662	-0.828	-0.843	0.223	-0.258	0.884 *
	0.224	0.083	0.073	0.718	0.675	0.046
Fe	0.16	-0.151	-0.464	-0.651	0.134	0.357
	0.797	0.808	0.431	0.234	0.83	0.555
Mn	0.503	-0.499	-0.577	-0.104	0.003	0.676
	0.388	0.392	0.309	0.867	0.996	0.211
Pb	0.384	-0.229	-0.449	-0.507	0.239	0.527
	0.524	0.711	0.449	0.383	0.699	0.361

1) * 表示显著相关

参考前人报道进行的主成分分析结果也显示^[25],堆肥 DOM 中类蛋白质荧光区 v_1 、 v_2 和 v_4 及 Al 分布在第二主成分的正方向,而类腐殖质物质与其他重金属分布在第二主成分的负方向上(图 4),进一步证实堆肥浸提液中 Al 主要与类蛋白质结合在一起,而其他重金属主要结合在腐殖质上.即堆肥处理降低了除 Al 外其他 6 种重金属的生物有效性.

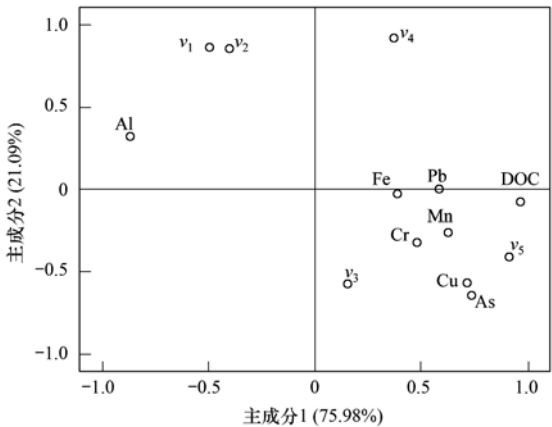


图 4 堆肥样品中水溶性重金属和有机物的主成分分析

Fig. 4 Principal factor analysis among dissolved heavy metals and organic matter in the compost sample

目前对于重金属生物有效性研究最新的技术为薄膜扩散梯度技术(diffusive gradients in thin-films technique,DGT)^[26],它是目前为止模拟生物吸收较好的一种新型原位采集并测量重金属生物有效性的技术^[27].DGT 技术所测量的重金属有效态是由结

合相的结合能力决定的.对于稳定结合的无机、有机配合物,DGT 技术中的结合相不能对其采集^[28],因此,对于堆肥浸提液中重金属的生物有效性,DGT 技术测定还存在一定缺陷.

3 结论

(1)堆肥过程有机酸主要产生于升温期,降温过程和二次发酵时期有机酸产生量很少,在各种有机酸中,苹果酸的含量最高.

(2)堆肥过程有机物的演化可分为降解、腐殖化和高度聚合化这 3 个过程,降解主要发生在堆肥升温期 and 高温期,而腐殖化和聚合化主要发生降温期和二次发酵过程.

(3)堆肥过程通过降低了水溶态重金属的含量和提高了腐殖质类物质的稳定性,从而降低堆肥样品中 Al、As、Cr、Cu、Fe、Mn 及 Pb 的生物有效性.

参考文献:

[1] Fuentes M, González-Gaitano G, García-Mina J M. The usefulness of UV-visible and fluorescence spectroscopies to study the chemical nature of humic substances from soils and composts [J]. Organic Geochemistry, 2006, 37(12): 1949-1959.

[2] Yu G H, Tang Z, Xu Y C, et al. Multiple fluorescence labeling and two dimensional FTIR-¹³C NMR heterospectral correlation spectroscopy to characterize extracellular polymeric substances in biofilms produced during composting[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(21): 9224-9231.

[3] Wei Z M, Xi B D, Zhao Y, et al. Effect of inoculating microbes in municipal solid waste composting on characteristics of humic acid[J]. Chemosphere, 2007, 68(2): 368-374.

- [4] He X S, Xi B D, Wei Z M, *et al.* Spectroscopic characterization of water extractable organic matter during composting of municipal solid waste[J]. *Chemosphere*, 2011, **82**(4): 541-548.
- [5] 李丹, 何小松, 席北斗, 等. 生活垃圾堆肥渗滤液污染物组成与演化规律研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(7): 422-428.
- [6] 赵越, 何小松, 席北斗, 等. 鸡粪堆肥有机质转化的荧光定量表征[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(6): 1555-1560.
- [7] He X S, Xi B D, Pan H W, *et al.* Characterizing the heavy metal-complexing potential of fluorescent water-extractable organic matter from composted municipal solid wastes using fluorescence excitation-emission matrix spectra coupled with parallel factor analysis[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(13): 7973-7984.
- [8] 何小松, 席北斗, 魏自民, 等. 堆肥过程中水溶性有机物常规荧光与固体表面荧光光谱比较[J]. *农业工程学报*, 2010, **26**(10): 272-276.
- [9] 李鸣晓, 何小松, 刘骏, 等. 鸡粪堆肥水溶性有机物特征紫外吸收光谱研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, **30**(11): 3081-3085.
- [10] 王玉军, 窦森, 李业东, 等. 鸡粪堆肥处理对重金属形态的影响[J]. *环境科学*, 2009, **30**(3): 913-917.
- [11] 李英军, 何小松. 鸡粪堆肥水溶性有机物转化特性研究[J]. *环境工程学报*, 2010, **4**(9): 2135-2140.
- [12] 杨楠, 于会彬, 宋永会, 等. 应用多元统计研究城市河流沉积物孔隙水中 DOM 紫外光谱特征[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(7): 1751-1757.
- [13] Zbytyniewski R, Buszewski B. Characterization of natural organic matter (NOM) derived from sewage sludge compost. Part 2: multivariate techniques in the study of compost maturation[J]. *Bioresource Technology*, 2005, **96**(4): 479-484.
- [14] He X S, Xi B D, Jiang Y H, *et al.* Elemental and spectroscopic methods with chemometric analysis for characterizing composition and transformation of dissolved organic matter during chicken manure composting[J]. *Environmental Technology*, 2012, **33**(17): 2033-2039.
- [15] Marhuenda-Egea F C, Martínez-Sabater E, Jordá J, *et al.* Dissolved organic matter fractions formed during composting of winery and distillery residues; Evaluation of the process by fluorescence excitation-emission matrix [J]. *Chemosphere*, 2007, **68**(2): 301-309.
- [16] Shao Z H, He P J, Zhang D Q, *et al.* Characterization of water-extractable organic matter during the biostabilization of municipal solid waste[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **164**(2-3): 1191-1197.
- [17] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. *Environmental Science and Technology*, 2003, **37**(24): 5701-5710.
- [18] Albrecht R, Le Petit J, Terrom G, *et al.* Comparison between UV spectroscopy and nirs to assess humification process during sewage sludge and green wastes co-composting [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(6): 4495-4500.
- [19] Knoth de Zaruk K, Scholer G, Dudal Y. Fluorescence fingerprints and Cu^{2+} -complexing ability of individual molecular size fractions in soil- and waste-borne DOM [J]. *Chemosphere*, 2007, **69**(4): 540-548.
- [20] Zhou L X, Yang H, Shen Q R, *et al.* Fractionation and characterization of dissolved organic matter derived from sewage sludge and composted sludge [J]. *Environmental Technology*, 2000, **21**(7): 765-771.
- [21] Jensen D L, Ledin A, Christensen T H. Speciation of heavy metals in landfill-leachate polluted groundwater [J]. *Water Research*, 1999, **33**(11): 2642-2650.
- [22] Calace N, Liberatori A, Petronio B M, *et al.* Characteristics of different molecular weight fractions of organic matter in landfill leachate and their role in soil sorption of heavy metals [J]. *Environmental Pollution*, 2001, **113**(3): 331-339.
- [23] Kalbitz K, Geyer W, Geyer S. Spectroscopic properties of dissolved humic substances—a reflection of land use history in a fen area[J]. *Biogeochemistry*, 1999, **47**(2): 219-238.
- [24] He X S, Xi B D, Cui D Y, *et al.* Influence of chemical and structural evolution of dissolved organic matter on electron transfer capacity during composting[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, **268**(15): 256-263.
- [25] 何小松, 余红, 席北斗, 等. 填埋垃圾浸提液与地下水中污染物组成差异及成因[J]. *环境科学*, 2014, **35**(4): 187-194.
- [26] Davison W, Zhang H. In situspeciation measurements of trace components in natural waters using thin-film gels[J]. *Nature*, 1994, **367**(6463): 546-548.
- [27] Webb J A, Keough M J. Measurement of environmental trace metal levels with transplanted mussels and diffusive gradients in thin films (DGT): a comparison of techniques [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2002, **44**(3): 222-229.
- [28] 隋殿鹏, 孙挺, 范洪涛, 等. 薄膜扩散梯度技术——一种原位富集采样技术[J]. *化学通报*, 2007, (12): 954-960.

CONTENTS

Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb	SHAO Ping, AN Jun-lin, YANG Hui, <i>et al.</i> (4031)
Distribution Characteristics of Pollution Gases and Water Soluble Ion in Aerosol During the Asian Youth Games of Nanjing, China	ZOU Jia-nan, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4044)
Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility	YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, <i>et al.</i> (4052)
Characteristic Analysis of a Multi-day Pollution Event in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area During October 2013	LIAO Zhi-heng, FAN Shao-jia, HUANG Juan, <i>et al.</i> (4061)
Application of On-line Single Particle Aerosol Mass Spectrometry (SPAMS) for Studying Major Components in Fine Particulate Matter	FU Huai-yu, YAN Cai-qing, ZHENG Mei, <i>et al.</i> (4070)
Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM ₁₀	CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, <i>et al.</i> (4078)
Distribution, Flux and Biological Consumption of Carbon Monoxide in the East China Sea and the South Yellow Sea in Summer	WANG Jing, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4085)
Spatial and Temporal Distribution of Mercury in Water of a Small Typical Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (4095)
Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds	LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, <i>et al.</i> (4103)
Variations of Annual Load of TN and TP in the Deep Bay Watershed, Shenzhen	ZHAO Chen-chen, ZHANG Shi-yan, MAO Xian-zhong (4111)
Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Sediments in Dianchi Lake	XIONG Qiang, JIAO Li-xing, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (4118)
Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake	ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4127)
Vertical Distribution Pattern and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Sediment Core from Pumoyum Co, Tibet	XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang (4135)
Heavy Metals Pollution and Analysis of Seasonal Variation Runoff in Xi'an	YUAN Hong-lin, LI Xing-yu, WANG Xiao-chang (4143)
Distribution and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Rainfall Runoff	WU Zi-lan, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4148)
Influence of the Substrate Composition in Extensive Green Roof on the Effluent Quality	CHEN Yu-lin, LI Tian, GU Jun-qing (4157)
Investigation of the Microbial Diversity and Structure of Biological Activated Carbon from Different Sources in Drinking Water Treatment Process	DU Er-deng, ZHENG Lu, FENG Xin-xin, <i>et al.</i> (4163)
Microcystin Safety Study During <i>Cyanobacteria</i> Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process	JIANG Xin-yue, LUAN Qing, CONG Hai-bing, <i>et al.</i> (4171)
Membrane Fouling Based on Change of Membrane Characteristic Parameters During Ultrafiltration of Protein	WANG Xu-dong, ZHANG Yin-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (4176)
Impact Factors and Degradation Mechanism for the Ozonation of Acetaminophen in Aqueous Solution	CAO Fei, YUAN Shou-jun, ZHANG Meng-tao, <i>et al.</i> (4185)
Degradation of Benzothiazole in Electro-Assisted Microbial Reactor	LIU Chun-miao, DING Jie, LIU Xian-shu, <i>et al.</i> (4192)
Preparation and Evaluation of Fe-La Composite Oxide Nanoabsorbent for As(III) Removal from Aqueous Solutions	ZHANG Wei, CHEN Jing, ZHANG Gao-sheng (4198)
Physiological Responses of Tubificidae to Heavy Metal Chromium Stress	LOU Ju-qing, YANG Dong-ye, CAO Yong-qing, <i>et al.</i> (4205)
Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, <i>et al.</i> (4212)
Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration	REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Fe ²⁺ and Fe ³⁺ on the Activity of ANAMMOX	LI Xiang, HUANG Yong, WU Chuan, <i>et al.</i> (4224)
Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	YIN Fang-fang, LIU Wen-ru, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (4230)
Effects of Salinity on N ₂ O Production During Nitrification Using Aerobic Granular Sludge	WANG Shan-shan, LIANG Hong, GAO Da-wen (4237)
Analysis of Microbial Community Variation in the Domestication Process of Sludge in a Sulfate-reducing Reactor	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan, ZHENG Xiao-hong, <i>et al.</i> (4244)
Quantifying the Influence of Different Matrices on Pb Accumulation in the Soil from Nanjing and Suspended Matter from the Lower of the Yangtze River with Pb Isotopic Technique	WANG Cheng, XIA Xue-qi, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4251)
Contamination Characteristics of Fluoroquinolones in Different Kinds of Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	SU Si-hui, HE Jiang-tao, YANG Lei, <i>et al.</i> (4257)
Effect of Environmental Factors on the Formation of Several Typical Tetracycline Resistance Genes in Soil	ZHANG Jun, LUO Fang-yuan, XIONG Hao-hui, <i>et al.</i> (4267)
Response of Nitrification/Denitrification and Their Associated Microbes to Soil Moisture Change in Paddy Soil	LIU Ruo-xuan, HE Ji-zheng, ZHANG Li-mei (4275)
Microbial Community Abundance and Diversity in Typical Karst Ecosystem to Indicate Soil Carbon Cycle	JIN Zhen-jiang, TANG Hua-feng, LI Min, <i>et al.</i> (4284)
Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils	WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, <i>et al.</i> (4291)
Influence of the Interaction Between Iron Oxide and Electron Donor Substances on 1,1,1-Trichloro-2,2-bis(<i>p</i> -chlorophenyl)ethane (DDT) Reductive Dechlorination in Hydragic Acrisols	LIU Cui-ying, XU Xiang-hua, WANG Zhuang, <i>et al.</i> (4298)
Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator	WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (4305)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales	LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4313)
Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years	LI Ping, LANG Man, XU Xiang-hua, <i>et al.</i> (4321)
Comparison Between Transgenic Insect-Resistant Cotton Expressing CryI _{Ac} Protein and Its Parental Variety in Rhizospheric Fungal Diversity	PAN Jian-gang, JIAO Hai-hua, BAI Zhi-hui, <i>et al.</i> (4329)
Concentrations of Mercury in Ambient Air in Wastewater Irrigated Area of Tianjin City and Its Accumulation in Leafy Vegetables	ZHENG Shun-an, HAN Yun-lei, ZHENG Xiang-qun (4338)
Combined Effects of 1-Nitropyrene and 1,2-Naphthoquinone on Cytotoxicity and DNA Damage in A549 Cells	SHANG Yu, JIANG Yu-ting, ZHANG Ling, <i>et al.</i> (4345)
Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals	BU Gui-jun, YU Jing, DI Hui-hui, <i>et al.</i> (4352)
Carbonization of Heavy Metal Cu Implanted Sewage Sludge and Stability of Heavy Metal in the Resulting Char	DOU Xiao-min, CHEN De-zhen, DAI Xiao-hu (4359)
Technological Characteristics of Bioreactor Landfill with Aeration in the Upper Layer	TIAN Ying, WANG Shen, XU Qi-yong (4365)
Impact of Nitrate Continuous Injection on N ₂ O Releases from Bioreactor Landfill	BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, <i>et al.</i> (4371)
Research on Contribution Decomposition by Industry to China's Carbon Intensity Reduction and Carbon Emission Growth	JIANG Jing-jing, YE Bin, JI Jun-ping, <i>et al.</i> (4378)
Shifting Path of Industrial Pollution Gravity Centers and Its Driving Mechanism in Pan-Yangtze River Delta	ZHAO Hai-xia, JIANG Xiao-wei, CUI Jian-xin (4387)
Method for Environmental Management in Paper Industry Based on Pollution Control Technology Simulation	ZHANG Xue-ying, WEN Zong-guo (4395)
Research Progress and Direction of Atmospheric Brown Carbon	YAN Cai-qing, ZHENG Mei, ZHANG Yuan-hang (4404)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年11月15日 第35卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 11 Nov. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行